

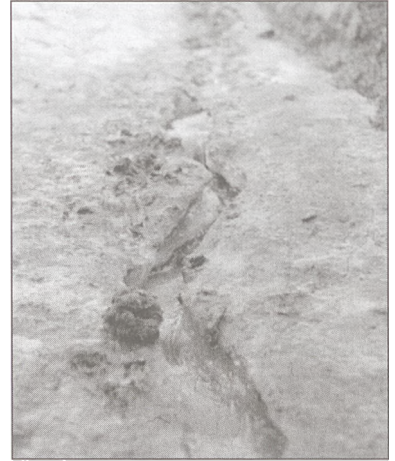
5.2. ODPIŁYW PODZIEMNY

Woda płynąca w korycie rzeczonym pochodzi z zasilania przez:

- **spływ powierzchniowy**, formowany przez wody spływające po powierzchni terenu w wyniku opadów deszczu lub roztopów,
- **spływ podpowierzchniowy** zwany **śródpokrywowym**, formowany przez wody spływające w glebie i pokrywach stokowych,
- **spływ podziemny**, formowany przez wody podziemne znajdujące się w obrębie zbiorników podziemnych.

Najbardziej trwałą formą zasilania rzeki jest spływ podziemny. Spływ powierzchniowy i podpowierzchniowy zachodzą okresowo (patrz rozdz. 3.2). Ta część odpływu ze zlewni, która pochodzi z zasilania podziemnego, określana jest mianem **odpływu podziemnego**. Może on być wyrażany w milimetrach warstwy wody, w jednostkach objętości lub też w postaci procentowego udziału odpływu podziemnego w odpływie całkowitym rzeki. Im większe jest zasilanie zbiorników wód podziemnych przez infiltrujące opady i wody powierzchniowe, oraz im większa jest pojemność zbiorników wód podziemnych w strefie aktywnej wymiany (strefa potamiczna), tym zasilanie podziemne rzeki jest większe. W okresach bezopadowych i bez roztopów, całkowita ilość wody w rzece pochodzi niemal wyłącznie z zasilania podziemnego. Oznacza to, że udział podziemnego zasilania rzeki w zasilaniu całkowitym sięga 100%. W okresach występowania opadów i w czasie roztopów, procentowy udział podziemnego zasilania jest mniejszy, jakkolwiek bezwzględna wielkość tego zasilania na ogół rośnie.

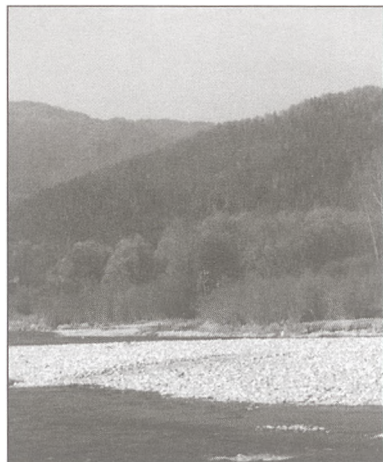
Odzwierciedleniem zmian sposobu zasilania rzeki w wodę jest przebieg hydrogramu. W okresach występowania opadów i roztopów, zaznaczają się na hydrogramie fale wezbraniowe, które są uformowane przez wody docierające do koryta rzeki po powierzchni terenu (spływ powierzchniowy) oraz w pokrywach (spływ podpowierzchniowy). Uzupełniają one tę część wody w korycie, która pochodzi z zasilania podziemnego.



Podczas wezbrań część wody pochodzi ze spływu powierzchniowego

5.2.1. Metoda ścięcia fali wezbraniowej

Jedną z metod umożliwiających obliczenie wielkości odpływu podziemnego i jego udziału w zasilaniu całkowitym jest metoda ścięcia fali wezbraniowej, zwana inaczej metodą **rozdziłu hydrogramu**. W okresach bezopadowych i bez roztopów woda w rzece pochodzi z zasilania podziemnego, a pole ograniczone linią hydrogramu i osią odciętych (czas) reprezentuje wielkość odpływu pod-

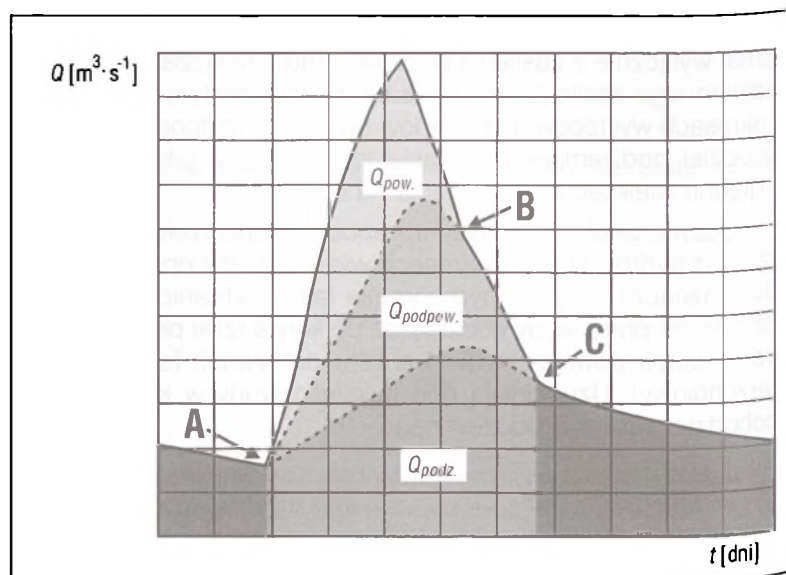


W czasie niskich stanów wody, rzeka zasilana jest wyłącznie wodami podziemnymi

ziemnego (pola najbardziej zacieniowane na ryc. 5.2.1). W czasie wezbrania spowodowanego opadami lub roztopami, poza wodą spływającą po powierzchni terenu, w korycie pojawia się także woda pochodząca ze spływu podpowierzchniowego. Następuje także wzrost zasilania podziemnego. Początek i koniec linii rozdzielających pola odpływu podziemnego $Q_{podz.}$, podpowierzchniowego $Q_{podpow.}$ i powierzchniowego $Q_{pow.}$ wyznaczają charakterystyczne punkty załamania hydrogramu (ryc. 5.2.1): na początku wezbrania (A) i w fazie opadania fali (B i C). O ile wyznaczenie punktu A nie sprawia na ogół trudności, to wyznaczenie punktów B i C może być trudne, zwłaszcza wtedy, gdy na przebieg opadania fali oddziałują różne czynniki zaburzające (np. niewielkie opady), które maskują punkty załamania. W takim przypadku, w celu uwydatnienia tych punktów na hydrogramie, zaleca się sporządzenie wykresu fali w układzie logarytmicznym osi przepływu. W praktyce, procedura ścięcia fali wezbraniowej sprowadza się najczęściej do wyznaczenia jedynie pól odpływu podziemnego $Q_{podz.}$ i powierzchniowego $Q_{pow.}$, przyjmując, iż zasilanie podpowierzchniowe (śródpokrywowe) jest składową powierzchniowej fazy zasilania. Sposób przeprowadzenia linii ścięcia (stopień jej wygięcia w górę) zależy zatem od doświadczenia badacza. Jest to największa wada tej metody.

alimentacja warstw wodonośnych (inaczej zasilanie wód podziemnych) – uzupełnianie zasobów wód podziemnych

Ryc. 5.2.1 . Zmiany sposobu zasilania rzeki w czasie wezbrania



Próba jednoznacznego ustalenia przebiegu linii ścięcia fali wezbraniowej została podjęta przez Natermanna. Szczegółowy opis tej metody można znaleźć w artykule I. Dynowskiej (1974).

Pracochłonność zaproponowanej metody, a jednocześnie nie do końca spełnione kryterium obiektywizmu sprawiły, że metoda Natemanna nie znalazła szerszego zastosowania. Stąd też proponowane są następujące, uproszczone schematy przebiegu linii ścieg:

1. Od chwili rozpoczęcia wezbrania odpływ podziemny rośnie, do punktu w czasie t_b (ryc. 5.2.2), i od tej chwili utrzymuje stałą wielkość, równą odpływowi w chwili ustania spływu powierzchniowego. Czas t_b wyznacza się ze wzoru (5.2.1):

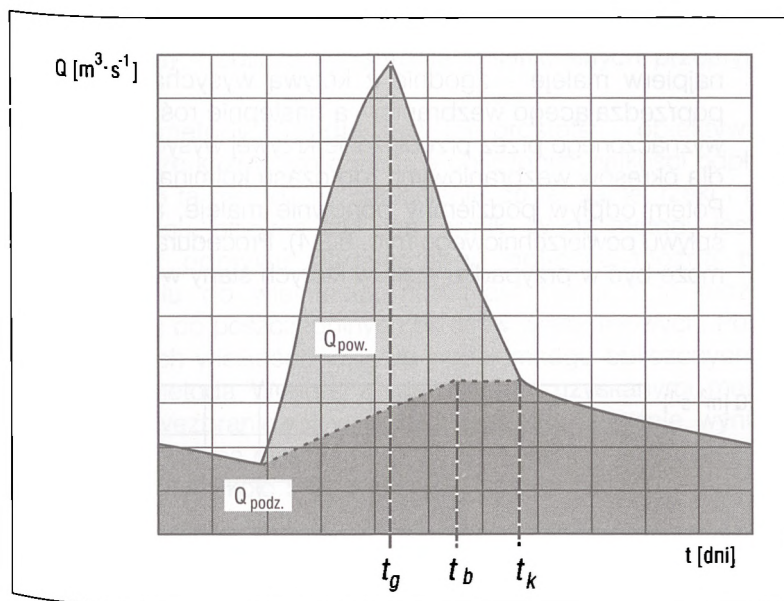
$$t_b = \frac{t_g + t_k}{2} \quad (5.2.1)$$

gdzie:

$$t_k = t_g + \left(\frac{A}{2}\right)^{0,2}$$

t_g – czas osiągnięcia kulminacji wezbrania,

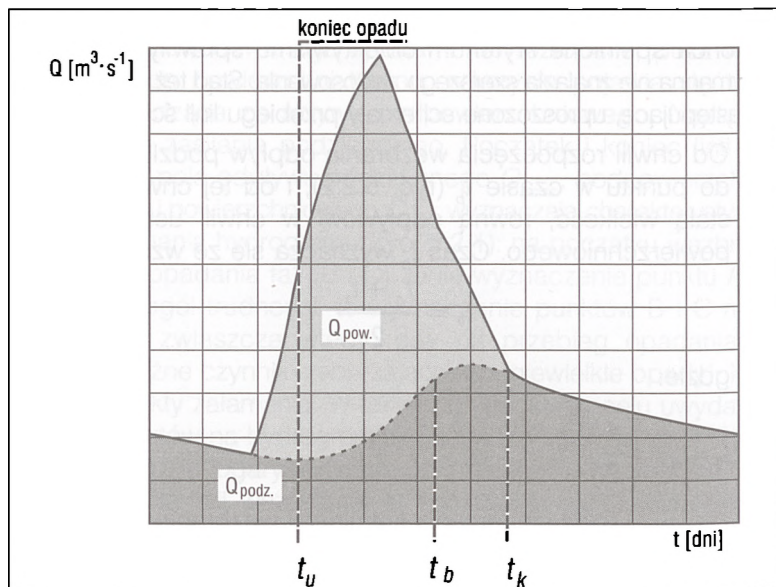
A – obszar zlewni w milach kwadratowych.



Ryc. 5.2.2. Uproszczony schemat rozdziału hydrogramu

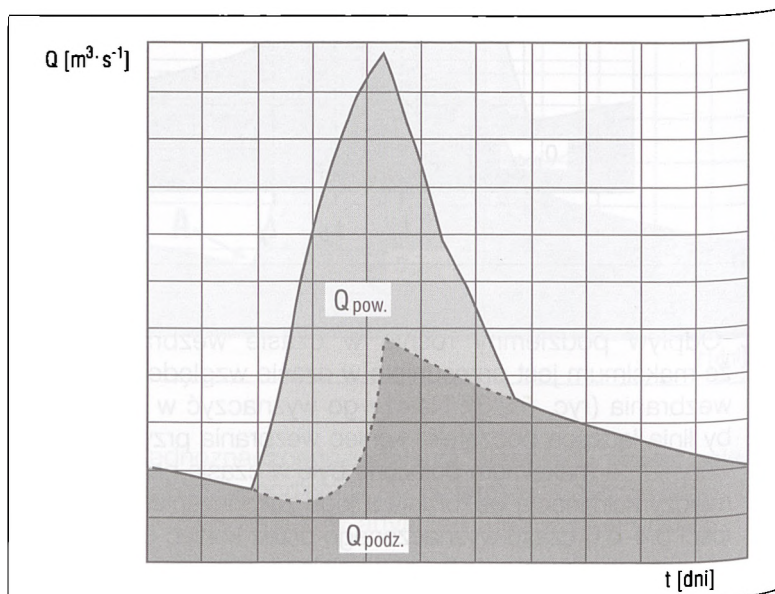
2. Odpływ podziemny rośnie w czasie wezbrania, z tym że maksimum jest przesunięte w czasie względem kulminacji wezbrania (ryc. 5.2.3). Należy go wyznaczyć w taki sposób, by linia łącząca początek i koniec wezbrania przybrała kształt litery „S”, a maksimum położone było w czasie przypadającym między kulminacją wezbrania a jego zakończeniem – w odległości 0,4–0,6 czasu wyznaczonego przez koniec opadu wywołującego wezbranie (0,4 – rzeki nizinne, 0,6 – rzeki górskie).

Ryc. 5.2.3. Schemat rozdziału hydrogramu (Kiciński, 1963)



3. Podczas wezbrania, w fazie przyboru wody, odpływ podziemny najpierw maleje – zgodnie z krzywą wysychania z okresu poprzedzającego wezbranie – a następnie rośnie do punktu wyznaczonego przez przedłużenie krzywej wysychania typowej dla okresów wezbraniowych, do czasu kulminacji wezbrania. Potem odpływ podziemny ponownie maleje, aż do ustania spływu powierzchniowego (ryc. 5.2.4). Procedura ta stosowana może być w przypadku rzek, w których stany wody podnoszą

Ryc. 5.2.4. Schemat rozdziału hydrogramu (Balco, 1966; za Bajkiewicz-Grabowska, Mikulski, 1984; zmienione)



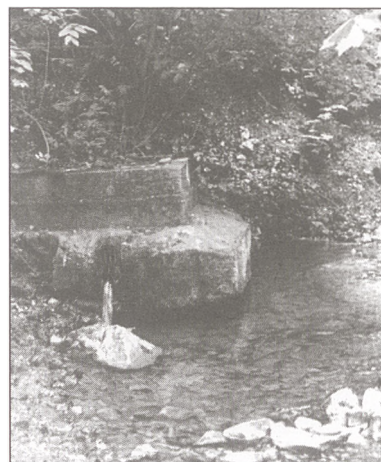
się w czasie wezbrań kilka lub nawet kilkanaście metrów i następuje infiltracja wód rzecznych w brzegi koryta i utwory terasy zalewowej. Następuje wtedy zasilanie aluwialnych wód podziemnych.

Rozwój technik obliczeniowych skłania badaczy do opracowania algorytmów pozwalających na automatyczne wyznaczanie linii ścięć, za pomocą komputera. Procedurę taką opracował np. E. Tomaszewski (2001).

5.2.2. Metoda Wundta

Wobec trudności wyznaczania linii ścięć, stosowane są często procedury wyznaczania odpływu podziemnego metodą rachunkową. Na przykład, w metodzie Wundta zakłada się, że średnia wieloletnia wielkość odpływu podziemnego rzeki jest równa wartości **średniej z minimalnych przepływów miesięcznych**. W celu określenia odpływu podziemnego bazowego – najbardziej trwałej formy odpływu podziemnego (stabilne zasilanie z głębokich horyzontów wodonośnych) – oblicza się średnią z minimalnych przepływów rocznych.

Zaletą metody Wundta jest jej prostota i obiektywizm, co oznacza, że każdy, kto dokonuje obliczenia wielkości odpływu podziemnego tą metodą, w odniesieniu do tej samej rzeki i tego samego okresu, otrzyma taki sam wynik. Wadą metody jest to, że wielkość odpływu podziemnego obliczyć można tylko w odniesieniu do wielolecia, natomiast nie jest to możliwe w odniesieniu do poszczególnych okresów wezbraniowych. Porównanie średnich wielkości odpływu podziemnego obliczonych dla wielu rzek metodą Wundta z wielkościami uzyskanymi metodą ścięcia fali wezbraniowej wykazało silne skorelowanie wyników uzyskanych obiema metodami, przy czym wyniki uzyskiwane metodą Wundta są około 5% wyższe.

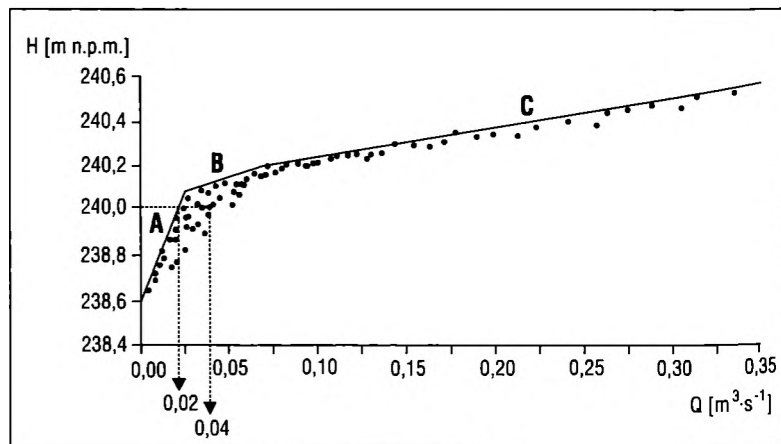


Wydajność źródeł może służyć do oszacowania odpływu podziemnego (źródło w Przybysławicach, dorzecze Dłubni)

5.2.3. Metoda Klinera i Knezeka

Metoda opracowana przez K. Klinera i M. Knezeka (1974) zakłada, że istnieje związek między wielkością odpływu podziemnego a stanem zwierciadła wód podziemnych w reprezentatywnej studni (studniach). Mając do dyspozycji codzienne wartości natężenia przepływu rzeki Q oraz codzienne stany wody podziemnej H , sporządza się wykres obrazujący zależność obu charakterystyk (ryc. 5.2.5). Górna obwiednia punktów o współrzędnych Q i H może posłużyć do obliczenia wielkości odpływu podziemnego odpowia-

Ryc. 5.2.5. Wyznaczanie wielkości odpływu podziemnego metodą Klinera i Knezeke (Kliner, Knezek; 1974)



dającego stanom wody podziemnej. Obwiednia ta jest najczęściej trójdzielna. Odcinek A (na ryc. 5.2.5) reprezentuje najbardziej trwałą składową odpływu podziemnego – odpływ bazowy, odcinek B – spływ śródpokrywowy, zaś odcinek C – płytki spływ podpowierzchniowy i spływ powierzchniowy. Obwiednia może być wyznaczona zarówno w odniesieniu do poszczególnych lat hydrologicznych, jak i do okresu wieloletniego. Stanowi ona wtedy tzw. **linię wzorcową** (master line). W każdym dniu, mając do dyspozycji stan wody podziemnej, można za pomocą obwiedni obliczyć wielkość odpływu podziemnego, wynikającą z jej przebiegu. Następnie można uzyskaną wielkość podzielić przez wartość natężenia przepływu rzeki, otrzymując w ten sposób udział zasilania podziemnego w zasilaniu powierzchniowym. Zamiast stanów zwierciadła wód podziemnych można także posłużyć się wydajnością źródła. Metoda K. Klinera i M. Knezeke odznacza się prostotą, co niewątpliwie jest jej zaletą. Trudne jednak może okazać się wytypowanie reprezentatywnego otworu obserwacyjnego wód podziemnych lub reprezentatywnego źródła.

5.2.4. Metoda izotopowa (^{18}O)

Atom tlenu ^{18}O składa się z 8 protonów i 10 neutronów, natomiast atom ^{16}O składa się z 8 protonów i 8 neutronów

O pochodzeniu wód w zlewni świadczy skład izotopowy wody. Zarówno tlen, jak i wodór wchodzące w skład cząsteczek wody mogą występować w postaci różnych izotopów. W przyrodzie występuje sześć naturalnych izotopów tlenu oraz trzy naturalne izotopy wodoru. Stabilnymi izotopami tlenu są ^{18}O , ^{17}O , ^{16}O , które występują w środowisku odpowiednio w ilości: 0,20%, 0,04%, 99,76% wchodząc w skład cząsteczek wody. Jak dotąd znanych jest 36 odmian izotopowych wody, choć odszukanie ich w formie naturalnej jest trudne. W badaniach hydrologicznych wykorzystuje się m.in. stosunek izotopów tlenu $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Skład izotopowy wody

wyraża się poprzez porównanie stosunku $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ w badanej próbce wody do stosunku $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ we wzorcu SMOW (*Standard Mean Ocean Water*). Takie porównanie pozwala na określenie względnego odchylenia od wzorca oznaczanego jako δ i wyrażanego w promilach:

$$\pm\delta^{18}\text{O} = \frac{R_w - R_{\text{SMOW}}}{R_{\text{SMOW}}} \cdot 1000 \quad (5.2.2)$$

gdzie:

$\delta^{18}\text{O}$ – odchylenie izotopu ^{18}O od wzorca [‰],

R_w – stosunek $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ w próbce badanej wody,

R_{SMOW} – stosunek $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ we wzorcu SMOW; $R_{\text{SMOW}} = 0,19934$.

Znak plus (+) oznacza, iż badana woda jest bogatsza, zaś znak minus (–) – uboższa w ciężki izotop tlenu (^{18}O) o daną wartość w promilach. Wartość $\delta^{18}\text{O}$ dla SMOW wynosi zero.

Wody opadowe wykazują znaczne wahania składu izotopowego; wartość $\delta^{18}\text{O}$ zmienia się w granicach od 0 do 55‰. Jest to spowodowane parowaniem wody lub skraplaniem. Podczas parowania wody, do atmosfery dostaje się przede wszystkim lżejszy izotop tlenu (^{16}O), natomiast podczas skraplania pary wodnej woda traci cięższe izotopy tlenu (^{18}O). Skład izotopowy wód opadowych jest uzależniony od wysokości bezwzględnej oraz szerokości geograficznej i zależy od temperatury powietrza: im chłodniej, tym ilość ^{18}O jest mniejsza.

W celu określenia udziału wód podziemnych (Q_G) w odpływie całkowitym ze zlewni (Q_T), zakładając, iż $Q_T = Q_P + Q_G$, wykorzystuje się zależność:

$$\delta_T^{18}\text{O} \cdot Q_T = \delta_P^{18}\text{O} \cdot Q_P + \delta_G^{18}\text{O} \cdot Q_G \quad (5.2.3)$$

gdzie:

Q_T – całkowity przepływ rzeczny [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

Q_P – składowa opadowa przepływu rzecznoego [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

Q_G – podziemna składowa przepływu [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$],

$\delta_T^{18}\text{O}$ – odchylenie ^{18}O w wodzie rzecznej [‰],

$\delta_P^{18}\text{O}$ – odchylenie ^{18}O w wodzie opadowej [‰],

$\delta_G^{18}\text{O}$ – odchylenie ^{18}O w wodzie podziemnej [‰].

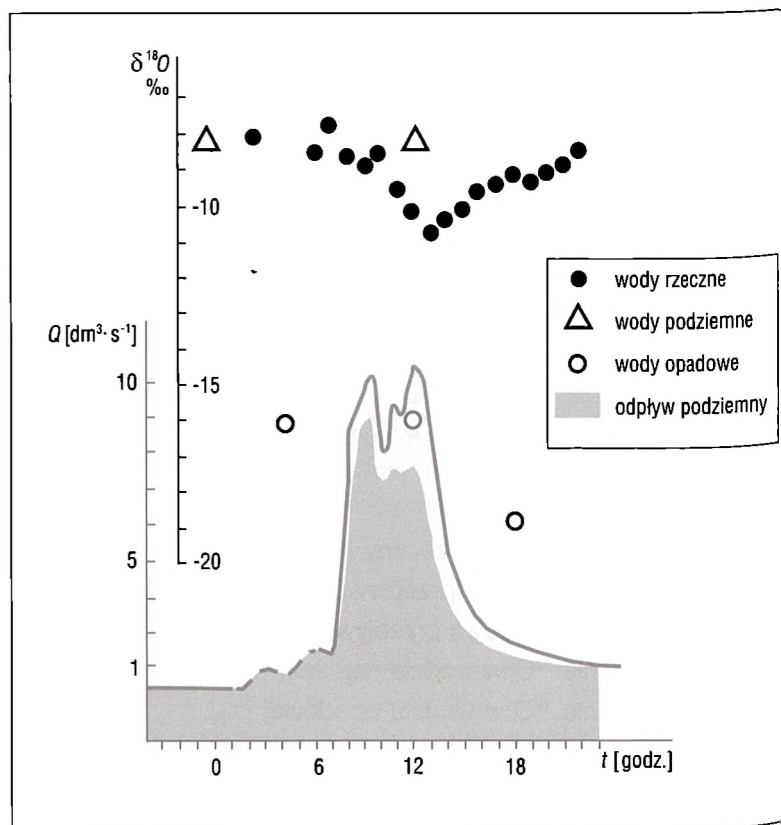
Z tej zależności można określić stosunek:

$$\frac{Q_G}{Q_T} = \frac{\delta_T^{18}\text{O} - \delta_P^{18}\text{O}}{\delta_G^{18}\text{O} - \delta_P^{18}\text{O}} \quad (5.2.4)$$

gdzie: oznaczenia jak we wzorze (5.2.3).

Zastosowanie niniejszej metody wymaga znajomości odchyleń ^{18}O w wodach opadowych, podziemnych i rzecznych. Analizy składu izotopowego wody wykonuje się za pomocą spektrometru mas; badania te należą do dość kosztownych, jednak uzyskane wyniki wskazują z dużą dokładnością na udział poszczególnych źródeł pochodzenia wód podczas wezbrania.

Dotychczasowe badania składu izotopowego wód rzecznych podczas wezbrań zarówno opadowych, jak i roztopowych wykazały, iż udział wód podziemnych w odpływie, określanych jako *pre-event water* (lub *old water*), jest znacznie większy, aniżeli wynikało to z dotychczas stosowanych metod genetycznego rozdziału hydrogramu odpływu (ryc. 5.2.6). W niektórych zlewniach udział ten szacowany jest na ok. 80%. Resztę stanowią wody opadowe (lub roztopowe), określane jako *event water*.



Ryc. 5.2.6. Rozdział hydrogramu odpływu rzeki Cannone na Korsyce, 26 X 1981 r. (Loye-Pilot, Jusserand, 1990; zmienione)

Przykład 1

Jaki jest udział odpływu podziemnego rzeki, jeśli natężenie przepływu wynosi $0,04 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, natomiast stan wody podziemnej – 240 m n.p.m. (ryc. 5.2.6). Wykorzystaj metodę Klinera i Knezeke.

Rozwiązanie

Zgodnie z krzywą wzorcową (ryc. 5.2.5), odpływ podziemny wynosi $0,02 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Oznacza to, że udział odpływu podziemnego w odpływie całkowitym jest równy 0,5, czyli 50%.

Zadanie 1

Dysponując rocznym ciągiem codziennych przepływów rzeki, oblicz metodą ścięcia fali wezbraniowej wielkość odpływu podziemnego oraz udział zasilania podziemnego w zasilaniu całkowitym rzeki. Zastosuj różne procedury wyznaczania linii ścięć i porównaj uzyskane wyniki.

Zadanie 2

Dysponując roczną serią pomiarową przepływu rzeki i stanów zwierciadła wód podziemnych oblicz wielkość odpływu podziemnego tej rzeki oraz udział tego odpływu w odpływie całkowitym.

Zadanie 3

Na podstawie minimalnych przepływów miesięcznych rzeki, oblicz wielkość jej odpływu podziemnego stosując metodę Wundta.

